

生物菌接地降阻技术在冶金矿山企业中的应用研究

欧阳琛,欧阳伟

(中国瑞林工程技术股份有限公司,江西 南昌 330002)

摘要:接地系统是保障电力设施、建筑和人员安全的核心环节,降低接地电阻一直是工程实践的难点。传统化学和物理降阻剂存在污染环境、强腐蚀和持续性差等问题。近年来,生物菌接地降阻技术引起人们广泛关注。文中重点介绍生物菌接地技术的相关原理,基于功能复合菌的微生物接地降阻技术,结合实验数据分析与工程实践,观察接地电阻变化,通过分析实验参数对降阻效果的影响,提出了优化接地电阻的策略,并应用于冶金矿山企业防雷接地中,为生物菌接地降阻技术进一步提高提供一定的借鉴。

关键词:微生物土壤电化学;接地技术;土壤电阻率;防雷接地;降阻剂

中图分类号:Q 936 文献标志码:A 文章编号:1006-348X(2025)06-0043-05

0 前言

接地装置是保障电流安全泄放入地的关键设施,其接地电阻值的大小直接关系到电力系统的稳定运行和人身设备安全。在土壤电阻率较高的地区如沙地、岩石地区,矿山等,如何经济有效地降低接地电阻是长期存在的工程难题。传统方法使用木炭、食盐等物理或化学降阻剂,这些方法虽能在短期内有效,但普遍存在离子流失、腐蚀接地体、污染土壤和地下水等弊端,难以满足可持续发展要求。在此背景下,一种模仿自然过程的绿色、可持续技术——生物菌接地降阻技术,为解决这一难题提供了全新的思路。生物菌接地降阻技术作为一种新兴的技术,其核心在于通过特定微生物的代谢活动改善土壤的结构及电化学性质,从而显著降低接地电阻,提升接地系统的综合性能。开发一种功能复合生物菌接地技术,并在冶金矿山企业输变电线路和工厂变配电装置的接地中得以应用。下文将系统说明生物菌接地技术的原理,探究微生物代谢与土壤电化学性质的相互作用机制,并结合矿山企业接地工程实践,验证其应用效果,对生物降阻剂的未来发展提出展望,为进一步提高技术水平和制定标准提供理论依据。

1 生物菌接地降阻技术的相关理论

微生物是体形微小(通常 $< 0.1\text{ mm}$)、结构简单的低等生物的总称,其数量极其庞大,在物质分解代谢与元素循环中扮演着不可替代的角色。微生物种类极其复杂多样,包含有细菌、真菌、放线菌,藻类等,其中,细菌在微生物中占比最大,种类最多,分布最广^[1]。

微生物降低土壤电阻的核心思想是:利用某些特定种类的微生物的新陈代谢活动,改变土壤的理化性质,特别是通过产生导电物质,改变离子环境或构建导电通路或改善土壤的结构,从而显著降低土壤的电阻率。

1.1 生物化学作用机制(增强离子导电路径)

这是最直接和主要的机制。微生物通过代谢反应,增加土壤孔隙水中导电离子的浓度。

有机物的分解与离子释放:当向土壤中添加有机质(如腐殖酸、农家肥、糖蜜等)作为微生物的“食物”时,异养型微生物(如细菌、真菌)会将其分解,这个过程会产生大量的有机酸(如乙酸、乳酸、草酸)和醇类等小分子物质。这些物质在水中会电离出 H^+ 和其他有机酸根离子,提高土壤溶液的离子强度和电导率,同时,分解的最终产物之一是 CO_2 ,溶于水后形成碳酸(H_2CO_3),进一步电离出 H^+ 和 HCO_3^- 离子,贡献导电性。

收稿日期:2025-07-11

作者简介:欧阳琛(1989),男,本科,工程师,从事工矿企业冶金电气工程设计工作。

氧化还原反应与离子转化:一些化能自养型细菌能参与土壤中硫、铁、氮等元素的循环,这些过程通常伴随着电子的转移和离子的生成/转化。例如硫酸盐还原菌,在厌氧条件下,利用有机物作为电子供体,将硫酸盐(SO_4^{2-})还原为硫化氢(H_2S), H_2S 溶于水形成氢硫酸,电离出 H^+ 和 HS^- 离子;同时, H_2S 还能与土壤中的金属离子(如 Fe^{2+})反应生成导电性良好的硫化亚铁(FeS)等矿物。铁还原菌可以将不溶于水、导电性差的三价铁氧化物(如 Fe(OH)_3)还原为可溶性的二价铁离子(Fe^{2+}),这个过程不仅释放了 Fe^{2+} 离子本身,还打破了铁氧化物对土壤中其他离子的吸附,释放出更多阳离子(如 K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}),共同提高离子浓度。

1.2 生物物理作用机制(建立电子导电路径)

微生物自身或其产物直接传递电子。1) 胞外电子传递:某些特殊微生物(如地杆菌属 *Geobacter*、希瓦氏菌属 *Shewanella*)具有“胞外呼吸”的能力,可以直接通过细胞表面的细胞色素蛋白,或利用自身表面产生的纳米导线(由蛋白质构成),将代谢产生的电子直接传递给土壤中的不溶性矿物(如铁锰氧化物)或直接传递给电极;2) 生物膜的形成与导电网络:某些微生物在土壤颗粒表面和孔隙中聚集,会形成富含胞外聚合物的生物膜。这些生物膜本身含有大量水分和离子,可以作为一个离子选择性导电通道。同时,如果生物膜内含有核黄素、黑色素等氧化还原活性物质,还能促进电子的穿梭,形成混合的电子-离子导电路径。生物膜像“导线”一样,将原本孤立的土壤颗粒连接起来,为电流提供了新的、更低电阻的流通路径。

1.3 生物结构作用机制(改善土壤物理结构)

微生物活动能间接改变土壤的物理结构,从而影响其导电性。1) 分泌粘性物质:微生物分泌的胞外聚合物具有黏性,能将细小的土壤颗粒粘结在一起,形成稳定的团粒结构;2) 改善孔隙结构:团粒结构的形成,增加了土壤的大孔隙比例,改善了土壤的透气性和透水性。这有利于水分和溶有离子的溶液在土壤中更均匀地分布和保持,为离子导电提供了更优的环境;3) 生物矿化:某些微生物能够促进导电矿物的形成(如铁硫化物),在土壤孔隙中构建稳定的导电路径;或者某些微生物通过特定代谢物,将松散的砂石土壤变得更加紧密结合,增强土壤导电性能。

1.4 生物菌接地技术的设计原则、思路与实现

1.4.1 设计原则

生物菌接地技术融合微生物学、材料科学与电化学原理,定向筛选强化菌群,构建自主调节系统。设计遵循微生物环境适配性、材料生物相容性、环境友好及动态调控机制等原则。

1.4.2 设计思路与实现

现场勘察与土壤分析。对不同深度和区域进行测量,了解电阻率分布。(1) 土壤理化性质分析:包括土壤类型、pH值、含水量、有机质含量、孔隙度、离子浓度等,这些数据是选择合适菌种和设计营养配方的基础。(2) 环境条件评估:地下水位、年平均温度、降雨量等。

复合菌群配方、生物营养缓释系统和接地体结构的设计,这些是技术实现的关键。

① 复合菌群配方设计

筛选适用于当地土壤环境的、具有上述一种或多种功能的土著或引进型菌种。典型的菌属包括:*Geobacter* (产电菌)、*Shewanella* (产电菌)、*Bacillus* (分泌EPS, 改善结构)、*Acidithiobacillus* (产生酸性物质, 改善pH)等,同时确定各菌种的最佳配比,确保它们之间是共生或互惠关系,而非竞争抑制关系。

具体设计思路详见图1。

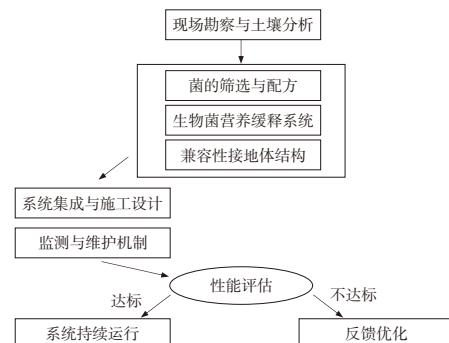


图1 生物菌接地技术设计思路

② 生物营养缓释系统设计

设计一种能为微生物长期提供“食物”的缓释材料。这种材料通常为多孔、可生物降解的有机-无机复合材料,成分可能包括:有机质(如淀粉、纤维素、腐殖酸)、氮源、磷源、钾源以及微量元素,无机材料如膨润土,锂云母,硅藻土等,能保证在初期快速启动微生物活性,后期缓慢释放,维持微生物群落数年甚至更久的生存时间。

③ 兼容性接地体结构设计

材料选择。需评估微生物活动对材料的潜在腐蚀影响,优选耐腐蚀且与微生物兼容的材料,如镀锌钢、铜覆钢、导电陶瓷等。

结构设计。采用表面积更大的结构,如多孔管状、星形带刺等,以提供更大的微生物附着面积;有时会设计成双层结构,内层为导体,外层为填充了菌剂和营养剂的多孔介质层。

系统集成与施工设计。将接地极、复合菌剂、营养缓释材料集成为一个完整的单元,设计科学的施工工艺,包括钻孔直径、深度、回填步骤(先回填菌剂和营养混合物,再回填特定土层)、初始激活用水量等,确保微生物有一个良好的初始生存环境。

监测与维护机制设计。设计长期的电阻监测系统和微生物检测方案。制定维护预案,如在极端干旱时期补充水分,或根据监测数据,在若干年后补充少量营养剂,以“唤醒”或增强微生物活性。

2 初步实验与结果分析

2.1 实验方法

将膨润土与功能复合菌混合,菌剂接种量为g膨润土 1×10^7 CFU,加入水和培养基混合均匀,含水率70%~80%,并装入直径为15 cm的PVC管中,中间预置铜管电极棒,设置对照组(膨润土和接地极),营养剂对照组(添加营养剂,不接种微生物),用于判断营养剂本身的影响。实验严格控制在恒温恒湿培养箱中进行,温度维持在 25 ± 0.5 °C,相对湿度80%,pH值通过磷酸缓冲液调节至6.0左右,以模拟地下接地系统的典型微环境。每组样品最少重复三个,记录所有容器的初始土壤电阻率。在接下来的30天内,定期(第1, 3, 7, 14, 21, 30天)进行以下指标测量:土壤电阻率、微生物数量、电阻率(采用微型四极法测量),微生物数量(采用平板计数法测量),土壤中流离离子浓度(采用原子吸收光谱法测定)。

2.2 接地系统构建

接地系统构建采用模块化设计。实验组接地极由热浸镀锌角钢与铜包钢复合材料构成;对照组使用相同规格的纯铜接地极。安装时,按GB/T 50065—2011要求开挖^[2]。

2.3 实验参数控制

设置三组重复实验单元,每组包含3个实验组和1个对照组,总样本量为12个测试点。接地系统安装后测初始电阻,随后在菌液接种后的第3、7、14、28天

进行跟踪测量。

2.4 实验结果与分析

2.4.1 接地电阻变化

实验室的小型初步实验数据表明,接种菌剂的处理组在30天内,接地电阻呈现显著下降趋势,这种显著差异在接种后第3天开始出现,降幅达54.35%($p < 0.01$);而未经处理的对照组仅下降12.14%,详见表1。

表1 实验室加生物菌与不加生物菌的膨润土电阻率

测试时间/d	电阻率/(Ω·m)	
	不使用生物菌	使用生物菌
1	12.35	10.13
3	10.85	5.35
7	11.01	4.76
14	11.25	5.10
21	11.56	5.25
30	11.22	5.02

2.4.2 微生物数量变化

通过微生物平板技术对微生物数量进行监测,发现微生物数量从第3天起,快速增加到108个/克土,随着培养时间增加,数量上略有增加,一直维持在108个/克土的数量级。

2.4.3 土壤电导率变化

实验组土壤电导率在接种后持续上升,第30天达到初始值的2.1倍,其中有效离子(K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+})浓度分别提升54%、37%和29%,这表明生物菌剂提高了土壤电解质含量。

3 工程实践与案例

3.1 工程实践

3.1.1 一种实用生物菌接地降阻剂研发

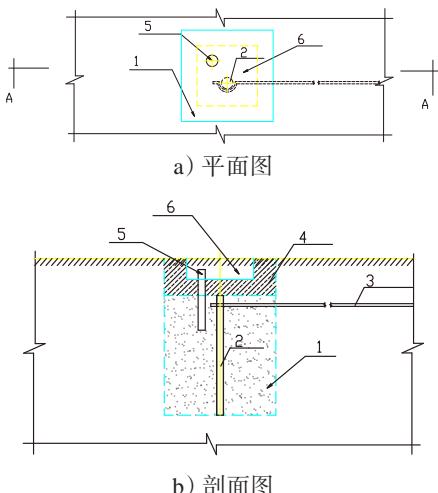
研发一种可供电网输电线路和变电站实用的生物菌接地降阻剂,确定它的组成及配制过程。生物菌接地降阻剂的组成方案一:由膨润土、矿山尾沙、微生物菌及水份组成,其组成物的质量比为:矿山尾沙10~70,膨润土30~90,外加微生物菌(104~1010个/g),水份是膨润土重量的34%~100%;生物菌接地降阻剂的组成方案二:由膨润土、微生物菌(104~1010个/g)及膨润土重量的34%~100%水份组成,其中膨润土主要成份是铝硅酸盐类矿物蒙脱石,矿山尾沙采自某铜矿尾矿,微生物菌采用硅酸盐菌^[3]。

降阻剂的配制过程为:将膨润土磨碎至100~200目,按组成比例加入尾沙,用相当于膨润土重量34%~

50%的水份将其搅拌均匀,在搅拌前,水中按比例加入生物菌,膨润土、尾沙总重量的0.5%左右营养物及0.05%左右的硫酸铵。

3.1.2 适用于生物菌接地降阻剂的接地坑设计及施工流程

生物菌接地降阻剂能降阻,菌种能在降阻剂中生成、繁殖,关键是降阻剂需常年保持水份,处于潮湿状态。生物菌接地降阻剂中主要成份膨润土具有很强的吸水保水功能,如果每年雨季能为生物菌接地降阻剂补足1至2次水,降阻剂性能将更稳定,保证接地降阻效果的长期性。为此,接地坑的设计采取了宜聚、吸雨水的措施。示意图见图2。



图中:1—生物菌降阻剂 2—垂直接地 3—接地线 4—回填层
5—检查管 6—检查孔

图2 生物菌接地降阻剂接地坑示意图

接地坑设计采取以下聚、吸雨水的措施:

- 1) 在回填层的上方设置能积水的检查孔;
- 2) 尽可能选择雨水能汇入处挖接地坑;在地势不利雨水汇入处的接地坑,上方开设引水槽;
- 3) 在检查孔底及降阻坑上方周围,铺透水性好的碎石;同时在接地坑中埋设一根带孔的检查管,有利于取样及菌种及养份补给。

生物菌接地降阻剂施工方法的步骤如下:

- 1) 按需求计算出接地坑尺寸,并将其挖好;将垂直接地极2垂直竖在接地坑中心,并根据规范要求使之与接地线3焊接。
- 2) 将配备好的生物菌降阻剂1倒入接地坑中,将垂直接地极2完全覆盖。当降阻剂1填至1m左右时,插入带孔检查管5,将其用作取样、菌种及养份补给通道,

方便对生物菌降阻剂的取样测试和日后的维护。

- 3) 回填500mm厚的原土作为回填层4。
- 4) 向回填层注入相当于降阻剂重量0.5~2倍的水份。
- 5) 在回填层4上用石块砌筑500×500×300(mm)的检查孔6,根据周围地势开挖引水槽,并用水泥抹面。
- 6) 在检查孔6底及周围铺一层100mm碎石,增加透水性。
- 7) 用带孔的模板或预制钢筋混凝土板封盖检查孔口,既是出于安全的需要,也不影响蓄水保水的效果。

3.2 冶金矿山企业应用案例

3.2.1 某尾矿库安全监测设备和防雷接地案例

1) 尾矿库电子设备所在建筑物防雷等级确定如下:

预计年雷击次数的公式为:

$$N = K \times Ng \times Ae \quad (1)$$

式中:N表示建筑物的年雷击次数,次;Ng表示建筑物地段的预计年平均密度,次/km²;Ae表示建筑物接收次数一样雷击数的等效面积,km²;K表示其校正系数,通常情况下为2。

2) 接地电阻计算:

接地网主要由垂直接地体与水平接地体组成,垂直接地体与水平接地体的电阻计算公式分别为式(2)和式(3)。

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d} \quad (2)$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{l^2}{d} + A \right) \quad (3)$$

公式(2)、(3)参见《实用接地技术》^[4]。

3) 防雷接地采用的专用降阻技术

经实际现场测量,该接地体土壤电阻率在185Ω·m,采用专用降阻剂与26个接地极的组合网与生物菌降阻技术结合后,实际测量接地电阻达到1Ω,使该电子设备防雷保护处于有效范围^[5]。

专用降阻主要是利用生物菌降阻技术原理。膨润土中含有K、Na、Ca、Al、Mg、Fe等多种活泼或较活泼的金属氧化物,作为强电解质被加入硅酸生物复合菌后,由于生物菌的作用,破坏了膨润土中金属氧化物晶格状态的共价键成分,使金属离子分解出来,大大增加它的导电性能。当地中电流通过时,它们会发生剧烈电解,形成树枝状的导电回路,使地中电流迅速扩散出去,从而取得良好的降阻效果。试验表明,当生物菌达到108

个菌/克土时,导电性能会有成倍的突破。

技术性能:膨润土中的主体成份为蒙脱石,它的分子结构呈四面体、八面体形状,具有很强的吸湿性,它的膨胀容一般在9左右,能吸收3~5倍的水,使降阻剂及其邻近部位保持湿润,从而获得稳定的降阻效果。同时膨润土中的氧化物大多为胶状物,可牢牢粘在接地钢材上,扩大了接地体与大地的接触面,使接地体与大地接触更紧密。经化验,南方膨润土pH值一般在8.1~9.25,呈弱碱性,对接地体有保护作用。

4) 接地电阻值直接影响雷电流的泄放能力和过电压限制水平,是防雷保护有效性的关键。

3.2.2 某矿山供电分公司输电线路接地电阻降阻案例

该项目实际应用情况如下:输电线路降阻采用生物菌接地降阻剂,由膨润土(70%)、微生物菌(10⁴个/克土)、矿山尾砂(40%~60%)、水分(100%)部分组成。三个接地实验坑的土壤电阻率分别为65.94 Ω·m,65.94 Ω·m和61.8 Ω·m;一个月后,测得三个实验接地坑电阻分别由25.54 Ω,25.54 Ω和23.73 Ω降为6.4 Ω,8.8 Ω和6.5 Ω,大大地低于规范所要求的10 Ω,土壤中微生物的数量则提高到了10⁷数量级水平,并且此后8个月中接地电阻的水平维持在一个较为恒定水平(除一号坑电阻稍微升高外)^[6]。

表2 生物菌接地降阻剂某矿山输电线路接地现场应用案例

实测数据

实验坑号		1号	2号	3号
基本情况	土壤电阻率(Ω·m)	65.94	65.94	61.8
	膨润土:尾矿	100:0	60:40	40:60
	无降阻剂计算值(Ω)	25.54	25.54	23.73
1个月	接地电阻(Ω)	6.4	8.8	6.5
	微生物数(个/g)	3.5×10 ⁷	3.3×10 ⁷	2.81×10 ⁷
2个月	接地电阻(Ω)	6.9	7.4	7.6
	微生物数(个/g)	1×10 ⁷	5.66×10 ⁶	9.6×10 ⁸
4个月	接地电阻(Ω)	7.8	6.8	8.3
	微生物数(个/g)	8.05×10 ⁷	1.86×10 ⁶	5.18×10 ⁷
6个月	接地电阻(Ω)	10.5	7.5	8
	微生物数(个/g)			
8个月	接地电阻(Ω)	10	7.6	8
	微生物数(个/g)	2×10 ⁷	1.5×10 ⁸	1.6×10 ⁸

实际应用表明,由膨润土、微生物复合菌剂、矿山尾砂及水分组成的生物降阻剂是一种实用、高效、环保、性价比高的降阻剂,配套接地坑设计与施工等技术有效可行。

4 结语

4.1 研究总结

4.1.1 技术原理与机制

深入探究生物菌接地技术原理,揭示微生物与土壤电化学性质相互作用机制,为技术优化提供理论基础。实验证明,该技术能显著降低接地电阻,提升系统稳定性。

4.1.2 应用效果与验证

通过大量实验与工程实践,验证生物菌接地技术在不同土壤及气候条件下的应用效果。结果显示,该技术能广泛适应复杂地质环境,实现接地电阻的有效降低。

4.1.3 技术优势与前景

总结生物菌接地技术在环保、长效及经济性方面的优势,展望其在未来电力系统、防雷工程及新能源领域的应用前景;强调该技术对构建可持续接地系统的重要性。

4.2 存在问题及改进方向

4.2.1 菌种筛选和菌群优化

针对特定土壤与气候,优化菌种筛选流程,提升筛选效率与准确性。通过定向筛选功能菌群,构建多菌种协同群落,增强生物菌接地技术对复杂地质条件的定殖能力和稳定性,确保其长效、高效运行。

4.2.2 适应性机制

深化生物菌接地技术环境适应性研究,探究不同微生物在不同土壤、气候条件下的代谢变化与效能差异;建立适应性评估体系,为技术推广应用提供科学依据。

4.2.3 长期生态评估

加强生物菌接地技术长期生态效应评估,关注微生物残留及生态影响,确保技术在提供可持续接地解决方案的同时,维护生态环境安全,促进人与自然和谐共生。

参考文献:

- [1] 朱永官,沈仁芳,贺纪正,等.中国土壤微生物组:进展与展望[J].中国科学院院刊,2017,32(6):554-565,542.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑物电子信息系统防雷技术规范:GH50343-2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [3] 杜晓春,欧阳伟.生物菌接地降阻技术的试验研究与工程应用[J].有色冶金设计研究,2010,31(02):17-18.
- [4] 刘丙江.实用接地技术[M].北京:中国电力出版社,2012.
- [5] 欧阳伟,徐玮环.尾矿库安全监测设备的防雷接地设计[J].有色冶金设计研究,2014,35(04):15-17.
- [6] 刘凤龙,徐军波,罗琳.生物菌接地降阻剂的研究及应用[J].江西电力,2010,34(05):57-60.